



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

## MĚŘENÍ V AUTOMATICKÉM ŘÍZENÍ

MEASUREMENT IN CONTROL

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

TOMÁŠ KAHÁNEK

VEDOUcí PRÁCE  
SUPERVISOR

ING. FRANTIŠEK VDOLEČEK, CSC.

BRNO 2010



Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automatizace a informatiky

Akademický rok: 2009/2010

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

student(ka): Tomáš Kahánek

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

### **Měření v automatickém řízení**

v anglickém jazyce:

### **Measurement in Control**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Velmi důležitou a nezastupitelnou roli v systémech automatického řízení hraje měřicí technika.

Cíle bakalářské práce:

Výsledkem práce je rešeršní studie, analyzující místo, úlohu a projevy správné volby měřicí techniky v systémech automatického řízení a vlivy měření na výsledek regulace.

Doporučená osnova práce:

1. Struktura regulačního obvodu
2. Měřicí technika v regulačním obvodu
3. Vlivy měření a měřicí techniky na výsledek regulace

Seznam odborné literatury:

JENČÍK, J.; Volf, J.; Technická měření : 1.vydání Praha : Vydavatelství ČVUT, 2000. 212 s. ISBN 80-01-02138-6.

ŠVARC, I.; Šeda, M.; Vítečková, M.; Automatické řízení : 1. vydání Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2007. 325 s. ISBN 978-80-214-3491-2.

Časopisy AUTOMA, AUTOMATIZACE

Firemní literatura

Vedoucí bakalářské práce: Ing. František Vdoleček, CSc.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2009/2010.

V Brně, dne 10.11.2009

L.S.

---

Ing. Jan Roupec, Ph.D.  
Ředitel ústavu

---

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.  
Děkan fakulty

## LICENČNÍ SMLOUVA



## **ABSTRAKT**

Bakalářská práce má seznámit čtenáře se základy regulačních obvodů, struktury zpětné vazby a měřicí techniky. Jsou zde popsány základní i rozšířené chyby měří a systémové vlivy, včetně nastínění metod pro snížení těchto negativních účinků, které ve svém důsledku nejvíce ovlivňují výslednou přesnost regulace.

## **ABSTRACT**

The purpose of this bachelor's thesis is to familiarize a reader with the basic regulation circuits structure, feedback structure and measurement technic. This document describes basic and advanced measurement inaccuracies, system influences including methods of reduction this unwanted influences, which mostly influence the regulation results.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Regulační obvod, regulátor, zpětná vazba, chyby měření, měřicí technika.

## **KEYWORDS**

Regulation circuit, regulator, feedback, measurement inaccuracies, measurement technic.





## **PODĚKOVÁNÍ**

Na tomto místě bych chtěl poděkovat všem, kteří mi byli nápomocní při zhotovování bakalářské práce. Především děkuji vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Františkovi Vdolečkovi, CSc. za cenné rady a připomínky.



## OBSAH

<b>Zadání práce.....</b>	<b>3</b>
<b>Licenční smlouva .....</b>	<b>5</b>
<b>Abstrakt .....</b>	<b>7</b>
<b>Poděkování .....</b>	<b>9</b>
<b>Obsah .....</b>	<b>11</b>
<b>1 Úvod .....</b>	<b>13</b>
<b>2 Struktura regulačního obvodu.....</b>	<b>15</b>
2.1 Dělení automatického řízení .....	15
2.1.1 Ovládání .....	15
2.1.2 Regulace .....	15
2.1.3 Vyšší formy řízení .....	16
2.2 Regulátory.....	16
2.2.1 Dělení regulátorů .....	17
2.2.2 Struktura regulátoru.....	18
<b>3 Měřicí technika v regulačním obvodu.....</b>	<b>21</b>
3.1 Měřicí řetězce.....	21
3.1.1 Klasický měřicí řetězec .....	21
3.1.2 Inteligentní vysílače měřených veličin.....	22
3.2 Senzory .....	23
3.2.1 Odezva senzoru .....	23
<b>4 Vlivy měřicí techniky na výsledek regulace.....</b>	<b>25</b>
4.1 Výsledná chyba měření.....	25
4.2 Nejistoty měření.....	25
4.2.1 Standardní nejistoty typu A .....	26
4.2.2 Standardní nejistoty typu B .....	27
4.3 Hodnocení kvality regulace .....	28
4.4 Vliv měření na kvalitu regulace .....	29
<b>5 Závěr .....</b>	<b>31</b>
<b>6 Seznam použité literatury .....</b>	<b>33</b>



# 1 ÚVOD

Měření a měřicí technika tvoří nedílnou součást všech regulačních obvodů. Bez měření by se automatické řízení stalo pouhým ovládáním. Samotná měřicí technika tak v neposlední řadě může velmi výrazně ovlivnit výsledek regulace.

Úkolem této bakalářské práce je popsat princip činnosti regulačního obvodu, měřicí techniky a zhodnotit vliv chyby měření na výsledek regulace. Dalším cílem je teoreticky popsat kde a proč tyto chyby vznikají a jak tyto chyby nejlépe eliminovat.

První kapitola této práce je zaměřena na dělení automatického řízení a rozbor regulátoru. Popisuje základní teorie řízení a jejich historický vývoj v praktickém použití. Následně se zabývá podrobnou strukturou a dělením samotného regulátoru. Následující kapitola popisuje samotnou stavbu měřicího řetězce. Popis funkcí jednotlivých členů, důležitost technologického pokroku spojeného s rozvojem mikroprocesorů. Poslední kapitola se věnuje problematice určování chyb a nejistot měření a jak se následně projevují na kvalitě regulace.

Závěr se pokusí zhodnotit přínos této práce a shrnout všechny poznatky o negativních vlivech a posoudit současný stav a budoucnost řešení této problematiky.



## 2 STRUKTURA REGULAČNÍHO OBVODU

Regulační obvody jsou nedílnou součástí našich životů. Setkáváme se s nimi v našich domovech, pracovištích, elektrických spotřebičích či automobilech. Jejich existence nám v jistých ohledech usnadňuje život či urychluje práci. Jejich vývoj souvisí s vývojem techniky obecně. V dnešní době činnost člověka přebírají automaty, počítače a v neposlední řadě prvky umělé inteligence. Tento poměrně složitý proces, při němž lidská řídicí činnost při výrobě i mimo výrobní proces je nahrazována činností různých přístrojů a zařízení nazýváme automatizací. Základem automatizace je řízení, jež je cílené působení na řízený objekt tak, aby se dosáhlo určitého předepsaného cíle. Podle toho jak řízení provádíme, lze rozlišit řízení ruční a automatické. Učebnicovým příkladem je řízení letadla člověkem a autopilotem.

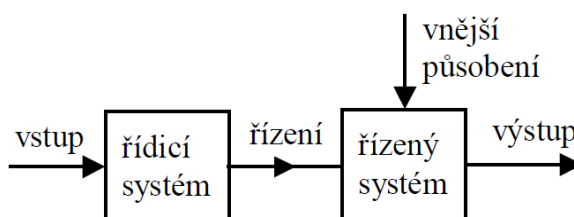
### 2.1 Dělení automatického řízení

Podstatným kritériem pro další dělení řízení je, zda výsledek řízení je anebo není zpětně kontrolován. Tímto se rozumí přítomnost zpětné vazby v regulačním obvodu. Podle tohoto kritéria rozlišujeme:

- Ovládání
- Regulaci
- Vyšší formy řízení.

#### 2.1.1 Ovládání

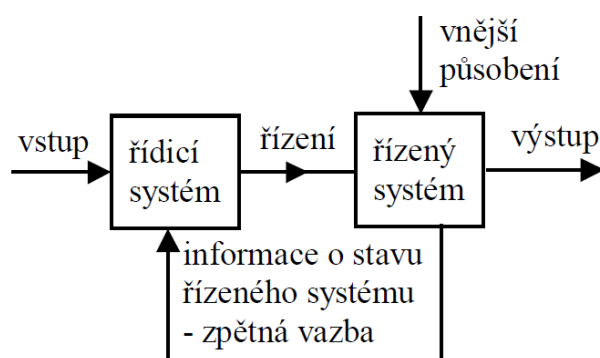
Ovládání je nejzákladnější způsob řízení. Jedná se o řízení bez zpětné kontroly – bez zpětné vazby. Řídicí systém nemá žádné informace o stavu výstupu a nemůže nijak kompenzovat výchyly od požadované hodnoty výstupu.



Obr. 1 Schéma ovládání. [2]

#### 2.1.2 Regulace

Regulace je řízení se zpětnou kontrolou – zpětnou vazbou. Regulace je udržování určité fyzikální veličiny výstupu na požadované hodnotě. Během procesu regulace se zjišťují hodnoty výstupní veličiny a srovnávají se s hodnotou, kterou má mít. Podle zjištěných odchylek se zasahuje do regulačního procesu tak, aby se odchylky odstranily.



Obr. 2 Schéma regulace. [2]

### 2.1.3 Vyšší formy řízení

Do této speciální skupiny patří:

*Optimální řízení* – je takové, kdy systém dosáhne požadovaných vlastností např. při minimu vynaložené energie, tedy s maximální účinností, nebo naopak v nejkratším čase. Systém je přitom schopen vyhledat nejvýhodnější působení a dosáhnout tak co nejlepšího chování celého systému v daných omezujících podmínkách. [2]

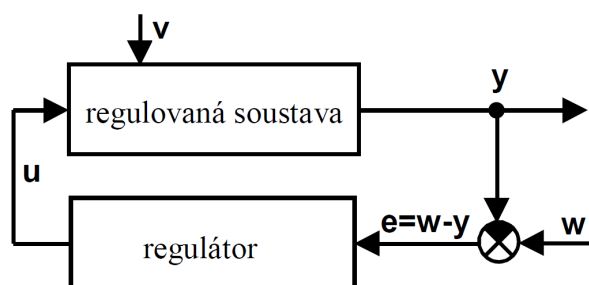
*Adaptivní řízení* – je takové, kdy systém je schopen měnit svou strukturu tedy i své para-metry tak, aby proces řízení probíhal stále optimálně, a to i při změnách parametrů řízeného objektu. Jestliže je adaptivní systém schopen ukládat přijaté informace do paměti a později v téže nebo podobné situaci znovu využívat získaných zkušeností, lze jej nazvat učícím systémem a proces řízení tohoto systému je učení. [2]

*Umělá inteligence* – jedná se o nejvyšší stupeň systému řízení. Umělá inteligence je vlastnost uměle vytvořeného systému, který má schopnost rozpoznávat předměty, jevy, analyzovat vztahy mezi nimi a tak si vytvářet modely okolí, dělat účelná rozhodnutí a předvídat jejich důsledky, řešit problémy včetně objevování nových zákonitostí a zdokonalování své činnosti. [2]

## 2.2 Regulátory

Regulátor je zařízení, které provádí regulaci prostřednictvím akční veličiny na regulovanou soustavu tak, aby byla výstupní veličina systému udržována na předepsané hodnotě a regulační odchylka byla v ideálním případě nulová nebo co nejmenší. Regulační obvod se skládá z regulované soustavy a regulátoru (Obr. 3)





Obr. 3 Regulační obvod. [2]

Vlivem poruchy „ $v$ “ dojde ke změně regulované veličiny, která se odchýlí od požadované hodnoty, jež je nastavena prostřednictvím řídicí veličiny „ $w$ “. Není-li shoda mezi řídicí veličinou „ $w$ “ a regulovanou veličinou „ $y$ “, vznikne regulační odchylka „ $e$ “ ( $e = w - y$ ). A právě tuto odstraňuje regulátor svým zásahem do regulované soustavy prostřednictvím akční veličiny „ $u$ “. Vlivem toho, že v obvodu je záporná zpětná vazba, je zásah regulátoru takového charakteru, že působí zmenšování regulační odchylky. Pokud je regulační odchylka nulová, je regulátor bez funkce a na jeho vstupu je nula.

Podle závislosti regulované veličiny vzniká několik druhů regulace:

*Na konstantní hodnotu* – v praxi nejčastěji se vyskytující případ regulace. Regulovaná veličina se udržuje na konstantní hodnotě ( $w = konst.$ ,  $y = konst.$ ). V praxi se jedná o regulaci teploty v místnostech či otáček motorů. U tohoto typu regulace je zvláště důležitá kompenzace vlivu poruchových veličin. [2]

*Programová* – jedná se o typ regulace, kdy je požadováno, aby se regulovaná veličina měnila v předepsaných hodnotách v předepsané časové závislosti. Regulovaná veličina je funkcí času, kdy  $w = f(t)$ ,  $y = f(t)$ . Příkladem je regulace teploty v pecích, kde se teplota musí podle časového programu měnit, aby bylo dosaženo správného technologického postupu. [2]

*Vlečná* – při této regulaci, se regulovaná veličina mění v závislosti na jiné vnější fyzikální veličině. Hodnota regulované veličiny má změny této vnější veličiny rychle a přesně sledovat. Matematicky vyjádřeno  $w = f(A)$ ,  $y = f(A)$ , kde  $A$  je právě onou vnější veličinou. Ilustračním příkladem v praxi je dávkovač chemikálií do vody, kdy požadujeme změnu množství dávkované chemikálie v závislosti od okamžitého průtočného množství vody. [2]

### 2.2.1 Dělení regulátorů

Dřívější rozdělení regulátorů bylo na direktivní (přímé) a indirektivní (nepřímé). Direktivní regulátory nepotřebují ke své činnosti pomocnou energii a veškerou energii potřebou pro svou činnost odebírají z regulované soustavy. Učebnicovým příkladem je regulátor vodní hladiny nádrže. Síla plováku na hladině postačí k posunu regulačního ventilu na výpusti nádrže. Avšak nejznámějším direktivním regulátorem je klasický Wattův regulátor otáček s roztěžníkem, dříve používaný u parních strojů. V dnešní době se s direktivními regulátory setkáme zřídka. Přestože jsou jednoduché a spolehlivé, jejich regulační dynamické vlastnosti jsou již dnes nedostačující. Dnes používané

indirektivní regulátor vyžadují vždy pomocný zdroj energie. A právě podle této pomocné energie je konstrukčně dělíme na regulátory:

*Pneumatické* – jsou vhodné v závodech, kde je proveden rozvod tlakového vzduchu. Dříve se hojně používaly ve výbušných prostředích (chemické výroby, naftové rafinerie, ...), kde se nemohly použít elektrické regulátory. Dnes je ale vytlačily právě elektrické regulátory vyrobené v nevýbušném provedení. Pneumatické regulátory jsou propojeny trubičkami, porucha se může zjistit podle syčení unikajícího vzduchu. Ke své činnosti používají ventily, membrány, clony a podobné pneumatické prvky. [2]

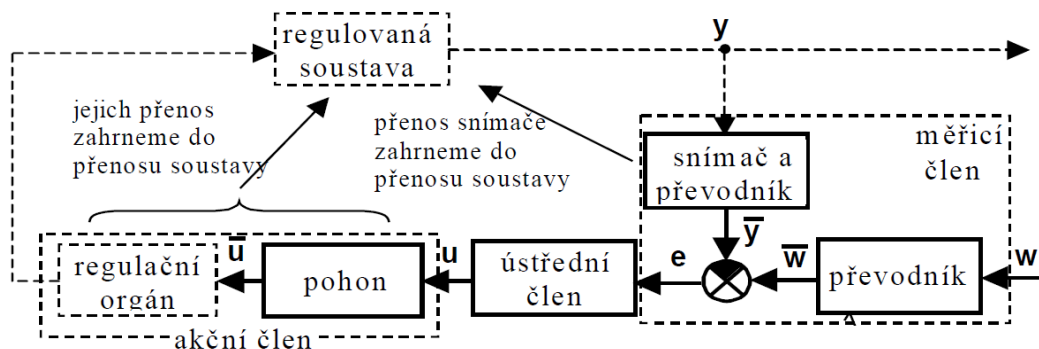
*Hydraulické* – využívají k napájení tlakový olej. Mohou vyvinout velkou sílu. Proto se používají (třeba v kombinacích s jinými typy regulátorů) hydraulické servoválce jako silové ovládací servomotory např. k ovládání regulačních lopatek vodních turbin apod. [2]

*Elektrické* – nejčastěji používané. Využívají k napájení elektrickou energii. Většinou jsou to elektronická zařízení (operační zesilovače), pouze akční členy jsou elektromechanické (servomotory, elektromagnety). Největší výhodou elektronických regulátorů jsou dobré regulační vlastnosti, malé rozměry a malá hmotnost, vysoká energetická účinnost, čistý a bezhlučný provoz, relativně nízká cena. Nevýhodou je větší složitost, která komplikuje opravy. Se zavedením integrovaných obvodů a dalších moderních součástek vzrostla i spolehlivost těchto systémů. Dnes nemají konkurenci v ostatních typech regulátorů. [2]

Dalším kritériem pro rozdělení regulátorů je dělení podle výstupního signálu na spojitý a nespojitý. Spojité regulátory pracují se spojitými signály. Hlavními stavebními prvky jsou operační zesilovače. Kvalita regulace je velmi dobrá, návrh regulace je poměrně snadný. Jsou základem regulační techniky. Nespojité regulátory pracují s nespojitými signály. Zde patří diskretní regulátory, jejichž výstup je posloupnost numerických hodnot – jsou to číslicové počítače ve funkci regulátorů. Do nespojitých regulátorů řadíme i regulátory dvoupolohové – charakter nespojitosti je zde ovšem trochu jiný, než u diskretních regulátorů.

## 2.2.2 Struktura regulátoru

Regulátor nelze chápat jako jeden prvek. Skládá se z několika prvků, které jsou mezi sebou vzájemně propojeny. Základem jsou tři prvky zapojené do série a to měřicí člen, ústřední člen a akční člen.



Obr. 4 Regulační obvod. [2]

*Měřicí člen* – pomocí něj zjišťujeme skutečnou hodnotu regulované veličiny, převádíme ji na elektrické napětí (u elektrických regulátorů) a vytváříme regulační odchylku. Měřicí člen se skládá ze snímače s převodníkem, z převodníku řídicí veličiny a z porovnávacího členu. [2]

*Ústřední člen* – zpracovává regulační odchylku. Regulační odchylku může zesilovat, integrovat či derivovat. Ústřední člen má rozhodující vliv na regulační pochod. Jeho vlastnosti můžeme volit a právě při návrhu regulátoru hledáme takový ústřední člen s takovými parametry, které nám zajistí vyhovující vlastnosti celého obvodu. [2]

*Akční člen* – se skládá z pohonu a regulačního orgánu. Regulační orgán je už často považován za součást regulované soustavy. Pohon nebo někdy též servomotor dodává energii regulačnímu orgánu, mění jeho polohu, natočení, otevření apod. Regulační orgán přímo ovládá akční veličinu. Mezi regulační orgány zahrnujeme různé ventily, klapky, šoupátka apod. U regulačního orgánu požadujeme lineární závislost mezi polohou pohonu a akční veličinou. [2]



### 3 MĚŘÍCÍ TECHNIKA V REGULAČNÍM OBVODU

Měřicí technika v regulačním obvodu je obsažena v měřicím členu a je základem zpětné vazby. Pro správnou funkci řídicího systému je potřeba získat přesná data nejen ze samotné regulované veličiny, ale pro zvýšení přesnosti regulace je potřeba získat také přesná data o parametrech okolí, či rušivých vlivech působících na soustavu. Zjednodušeně lze tedy říci, že čím více relevantních dat řídicí systém dostane, tím přesněji může plnit svou funkci.

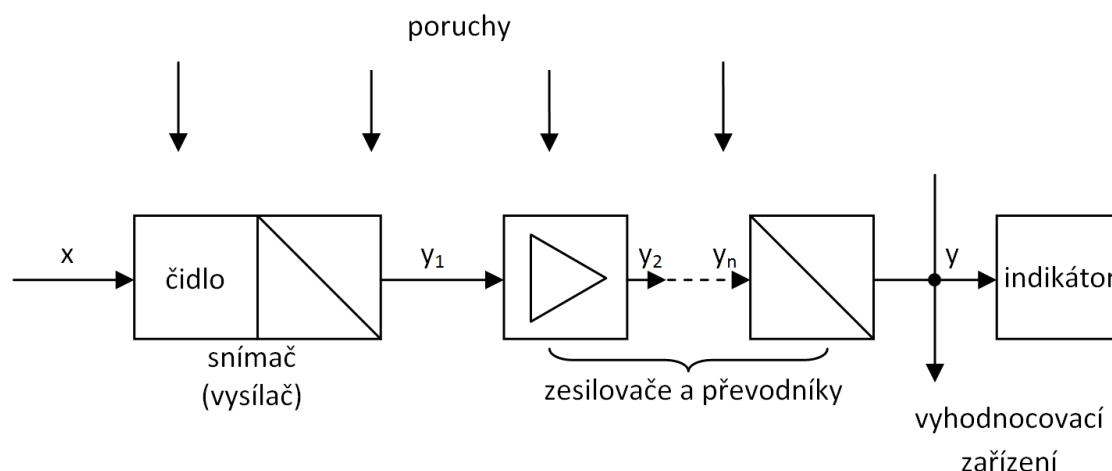
#### 3.1 Měřicí řetězce

Měřicí řetězec představuje řetězec bloků, v nichž dochází k transformaci měřené veličiny, většinou značenou „ $x$ “, na veličinu výstupní, většinou značenou „ $y$ “. Každá součást měřicího řetězce vnáší do systému své konkrétní vlastnosti, a tak je tedy potřeba věnovat pozornost jak jejich parametrům a vlastnostem, tak i výslednému chování celku. V praxi se snažíme, aby hodnota sledovaného parametru byla u všech prvků řetězce, co nejvíce shodná. Při nevyváženém poměru působí jediný prvek destruktivně na celý řetězec a následně tedy i na celý regulační obvod, což vede k znehodnocení regulace. Prioritní jsou vlastnosti jako přesnost a spolehlivost.

Přestože se snažíme, aby hodnoty sledovaného parametru byly u všech prvků řetězce, co nejvíce shodné, v praxi se to nemusí vždy podařit. Především snímač, vysílač a přijímač výslednou přesnost ovlivní více než značně přesnější převodníky a zesilovače, jejichž vliv na výsledek lze někdy dokonce i zanedbat.

##### 3.1.1 Klasický měřicí řetězec

Klasický měřicí řetězec je schematicky znázorněn na obr. 5. Jeho základem je vhodný snímač, předzesilovač, převodník, zesilovač, vysílač, přijímač, filtr, převodník, vyhodnocovací člen signálu a případně indikátor. V dnešní době je však větší pozornost věnována vývoji a praktickému nasazení inteligentních měřicích systémů.

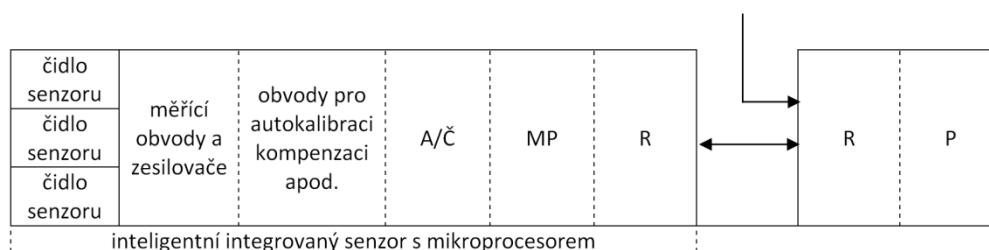


Obr. 5 Blokové schéma klasického měřicího řetězce. [1]

### 3.1.2 Inteligentní vysílače měřených veličin

Obsahují obvody pro zpracování a analýzu signálu z čidla v jediném kompaktním provedení spolu s čidlem. Cílem těchto řetězců je integrace měřícího řetězce na jediný čip v obvodu. Jejich výhodou je jednodušší nasazení v praxi a možnost připojení přes rozhraní do sběrníkových sítí (např. „Fieldbus“).

Základem je čidlo, měřící obvody, obvody pro kalibraci a kompenzaci chyby měření, analogově číslicový převodník, jednočipový mikropočítač nebo sběrníkový systém a rozhraní. Blokové schéma je vyobrazeno na obr. 6.



Obr. 6 Blokové schéma inteligentního měřícího řetězce. [1]

Existují i typy inteligentních vysílačů, u kterých bývá vyhodnocovací zařízení od čidla odděleno. Je to z důvodu provozování v extrémních provozních podmínkách, kde by byly kladeny vysoké požadavky na elektroniku. [1]

Strukturu inteligentního vysílače lze rozdělit na vstupní, vnitřní, výstupní a napájecí část. [1]

*Vstupní část:* – převod měřené veličiny na elektrický signál, jeho zesílení a filtrace

- linearizace statické charakteristiky
- přepínání více vstupních veličin
- ochrana proti působení parazitních veličin

*Vnitřní část:* – analogově-číslíkový převod

- autokalibrace elektrické, popř. neelektrické části měřícího řetězce

- číslicová linearizace
- aritmetická operace
- autodiagnostika
- statické vyhodnocování naměřených dat
- dálkové ovládání rozsahů (zesílení) přes rozhraní
- hlídání mezí
- registrace mezivýsledků až po umělou inteligenci

*Výstupní část:* – unifikace analogových výstupních signálů

- komunikace skrze integrované rozhraní se sběrníkovým systémem

- výkonové binární výstupy
- číslicově-analogový převod

*Napájecí část:* – napájení včetně ochrany proti přepětí

## 3.2 Senzory

Senzory jsou zařízení, které jsou v přímém styku s regulovanou veličinou. Podle technologie výroby lze senzory dělit na mechanické, elektromechanické, monolitické, tenkovrstvé a tlustovrstvé.

*Mechanické a elektromechanické* – tvoří skupinu klasických prvků starší generace. Jsou vyráběny v menších sériích, a tudíž je jejich produkce více nákladná. Obvykle se vyznačují robustní konstrukcí a lze je vyrobit velmi precizně. [1]

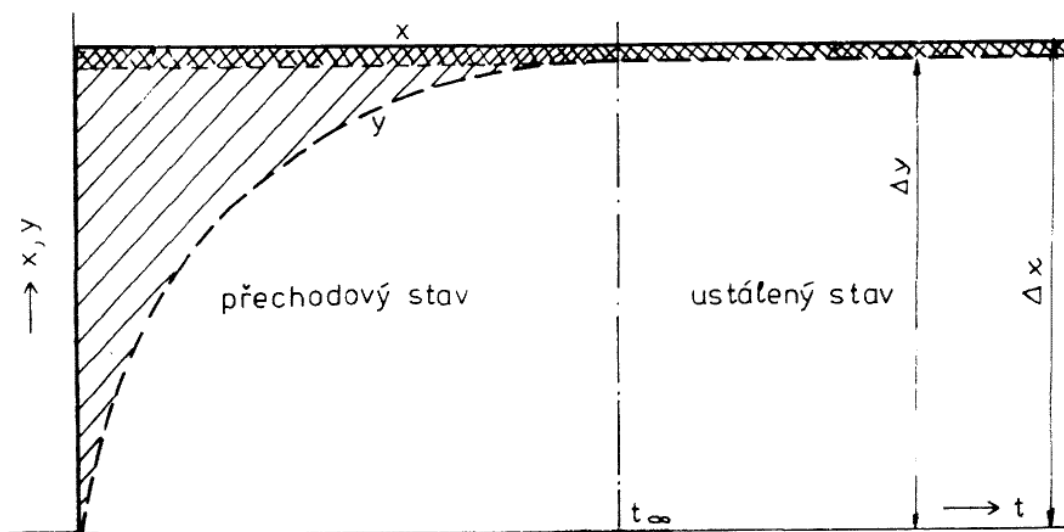
*Monolitické* – vyrábějí se běžnými postupy používanými při výrobě integrovaných obvodů na substrátu monokrystalického křemíku. Základem je tzv. Si - technologie. Jejich aplikace je především vhodná při teplotách nad 150°C. [1]

*Tenkovrstvé* – se vyrábějí monokrystalickými, polykrystalickými a amorfními vrstvami křemíku, izolantů a kovů o tloušťce 1nm až 1μm. Vrstvy se nanášejí vakuovým nebo katodovým napařováním na základní vrstvu ze skla nebo plastu a litografií a selektivním leptáním se vytvářejí prvky pasivní sítě vysílače. Tenkovrstvá technologie zajišťuje u snímačů vysokou přesnost, stabilitu, spolehlivost, malou hmotnost a rozměry. Díky těmto parametrům mají také rychlou odezvu. Jejich výroba je levná a sériová a lze je integrovat s Si - integrovanými obvody. [1]

*Tlustovrstvé* – se vytvářejí pastami vhodného složení, které se postupně přes síťka nanášejí na keramickou nebo plastovou vrstvu. Poté se suší a vypalují. Tlustovrstvé technologie se používá při výrobě vodičů, rezistorů a kapacitorů. Senzory lze doplňovat integrovanými obvody zapouzdřenými nebo ve formě čipu. [1]

### 3.2.1 Odezva senzoru

Obecně je nutno posuzovat vlastnosti měřících přístrojů podle toho, zda se jedná o přechodový či ustálený stav. Jednotlivé typy senzorů se liší svou mechanickou konstrukcí, která tak ovlivňuje výsledný čas odezvy. Ukázkový průběh reakce na skokovou změnu měřené veličiny je vyobrazen na obr. 7.



Obr. 7 Odezva snímače na skokovou změnu měřené veličiny. [1]

V čase  $t=0$  až  $t=Q$  se údaj přístroje mění a nachází se v tzv. *přechodovém stavu*. Průběh změny údaje přístroje je dán jeho dynamickými vlastnostmi popsány např. diferenciální rovnicí. Od  $t=Q$  se údaj přístroje již nemění, je v tzv. *ustáleném stavu*. Jeho údaj je ovlivněn statickými vlastnostmi, popsány algebraickými vztahy. [1]



## 4 VLIVY MĚŘÍCÍ TECHNIKY NA VÝSLEDEK REGULACE

U automatického řízení nás prioritně zajímá dosažený výsledek resp. jeho kvalita. Kvalita měření ve zpětné vazbě výrazně ovlivní výslednou regulaci celého systému. V praxi se jen zcela výjimečně shoduje správná hodnota měřené veličiny s hodnotou naměřenou prostřednictvím měřicí techniky. Takto vzniklý rozdíl mezi oběma hodnotami je chybou měření, která by ale podle současné metodiky mezinárodních metrologických předpisů měla být uváděna jako nejistota měření. Zatím se však důsledně uplatňuje jen v oboru vrcholové metrologie.

### 4.1 Výsledná chyba měření

Pro tradiční přístup k určení výsledné chyby příkladového modelu měřicího řetězce (obr. 5), kde jsou jednotlivé elementy spojeny v sérii, se použije vztah, kdy výsledná relativní chyba  $C$  odpovídá součtu dílčích relativních chyb  $\delta_i$ . Takto zvolený přístup je v praxi dobře použitelný, protože u měřicí techniky bývá velmi často uváděna přesnost právě v podobě třídy přesnosti  $T_p$ , v horším případě ji lze snadno určit z údajů obsažených v technické dokumentaci zařízení. Výsledná relativní chyba, zpravidla uváděná v procentech měřicího rozsahu přístroje, se tedy určí za použití vztahů (1) nebo (2). [3]

$$\delta c = \sum_{i=1}^n \delta i \quad (1)$$

$$\delta c = \sum_{i=1}^n T p i \quad (2)$$

Pro názornost lze celou situaci přiblížit modelovým příkladem, kdy jednotlivé elementy měřicího řetězce budou mít vlastnosti velmi podobné. Pro desetičlenný řetězec s přesností 0,1% jednotlivých elementů, bude tedy výsledná chyba zpětné vazby dosahovat 1%. Pokud by ve stejném systému chyba jednotlivých elementů vzrostla na 0,5%, výsledná chyba by již představovala celých 5%. V praxi ovšem existují elementy měřicího řetězce, u kterých je chyba minimální až zanedbatelná. Jedná se především o převodníky a zesilovače. Větší chyby vykazují snímače, přijímače a vysílače. [3]

Regulátor v regulačním obvodu tedy nebude schopen odstranit chyby vzniklé v měřicím řetězci. V případě maximálně přesného regulátoru lze konstatovat, že např. při 3% chybě měřicího řetězce existující před vstupem do regulátoru, bude tato chyba zachována. Stejnou chybou bude postižena i hodnota regulované veličiny, pokud akční člen dále neovlivní výsledek regulace negativním směrem.

### 4.2 Nejistoty měření

Novodobým trendem pro vyjadřování nepřesností výsledků měření i měřicí techniky, je postupný přechod k nejistotám měření. Tento pojem, často zkracován

na *nejistota*, označuje parametr, který souvisí s výsledkem a charakterizuje rozsah hodnot, jež lze přiřadit k hledané hodnotě měřené veličiny. Výsledná nejistota se zpravidla skládá z několika složek, které pocházejí od různých zdrojů nejistot působících na celý proces měření. [3]

Pro určení nejistot se používají dvě základní metody, podle nichž jsou nejistoty děleny do dvou skupin. Nejistoty vyhodnocované při použití tzv. metody A jsou zjišťovány statistickým zpracováním, zatímco pomocí metod B jsou nejistoty zjišťovány jinak než statisticky. Podle způsobu vyjádření lze hovořit o nejistotách standardních a rozšířených. [3]

Své zdroje mají nejistoty měření ve všech jevech, které nějakým způsobem ovlivňují neurčitosti a nejednoznačnosti stanovení výsledků měření. Poměrně jednoduchý je postup při přímých měřeních, kde většina zdrojů nejistoty přímo ovlivňuje hodnoty výstupních veličin. Při nepřímých měřeních se zdroje projeví u jednotlivých veličin, které dále vstupují do následného zpracování a vyhodnocení nepřímo měřené výstupní veličiny, takže zdrojů nejistot se zde nalézá zpravidla mnohem více a v rozmanitější skladbě. [3]

Pro měření se jako zdroje nejistot převážně uplatňují [3]:

- neznámé a nekompensované vlivy prostředí
- nevhodná měřicí metoda
- nevhodný výběr přístroje (měřicí techniky)
- zjednodušené zpracování naměřených dat (linearizace apod.)
- rušivé vlivy při dálkovém přenosu dat

#### 4.2.1 Standardní nejistoty typu A

Jsou způsobeny náhodnými chybami, jejichž příčiny se považují všeobecně za neznámé. Stanovují se z opakovaných měření stejné hodnoty měřené veličiny za stejných podmínek. Tento typ nejistoty se zmenšuje se stoupajícím počtem opakovaných měření. Předpokládá se existence náhodných chyb s normálním rozdělením. Standardní značení je  $u_A$ . [1]

Pro přímé měření platí [1]:

- Odhad údaje  $y$  měřené veličiny je dán výběrovým průměrem  $\bar{y}$  z  $n$  - naměřených hodnot podle vztahu:

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \quad (3)$$

- Směrodatná odchylka výběrových průměrů  $s(\bar{y})$  je zvolena za standardní nejistotu typu A vztahem:

$$u_A = s(\bar{y}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n(n-1)}} \quad (4)$$

- Pokud je počet opakovaných měření menší než deset a není možné učinit kvalifikovaný odhad na základě zkušenosti, určí se korigovaná nejistota  $u_{AK}$  ze vztahu (5), kde je koeficient  $k$  závislý na počtu opakování a jeho hodnotu lze získat z příslušné tabulky.

$$u_{AK} = k \cdot s(\bar{y}) \quad (5)$$

Pro nepřímé měření platí:

- Velikost standardní veličiny  $u_A$  se určí ze vztahu (6), kde  $\bar{x}_j$  jsou výběrové průměry jednotlivých měřených veličin a  $p_h$  jsou hodnoty parametrů  $P_h$ .

$$u_A^2 \equiv s(\bar{y})^2 = \sum_{j=1}^m A_{xj}^2 \cdot s(\bar{x}_j) + 2 \sum_{j=2}^m A_{xj} \cdot A_{xk} \cdot s(\bar{x}_j) \quad (6)$$

#### 4.2.2 Standardní nejistoty typu B

Jsou způsobovány známými a odhadnutelnými příčinami vzniku. Jejich identifikaci a základní hodnocení provádí experimentátor. Jejich určování nebývá vždy jednoduché. U složitých měřicích zařízení a při zvýšeném požadavku na přesnost, musí provést podrobný rozbor chyb, což vyžaduje značné zkušenosti. Tyto nejistoty vycházejí z různých zdrojů a výsledná nejistota typu B je dána jejich sumací. Při tomto výpočtu nezávisí na počtu opakovaných měření. Standardní značení je  $u_B$ . [1]

Při výpočtu se nejprve vytipují možné zdroje nejistot  $Z_j$ . Mezi tyto nejistoty patří např. nedokonalé měřicí přístroje, použité měřicí metody, nepřesné hodnoty konstant, způsob vyhodnocování. Odhadne se rozsah odchylek  $\pm \Delta Z_{max}$  od jmenovité hodnoty tak, aby jeho překročení bylo málo pravděpodobné. Dále se odhadne, jakému rozdělení pravděpodobnosti odpovídají odchylky  $\Delta Z$  v intervalu  $\pm \Delta Z_{max}$  a určí nejistoty  $u_z$  ze vztahu  $u_z = \Delta Z_{max} / m$ . Hodnota  $m$  závisí na druhu rozdělení. Určí se standardní nejistoty  $u_z$  těchto zdrojů (např. převzetím hodnot nejistot z technické dokumentace jako jsou certifikáty, kalibrační listy, technické normy, údaje výrobců, technické tabulky apod.) a přepočítají na složky nejistoty měřené veličiny  $u_{zj}$ . [1]

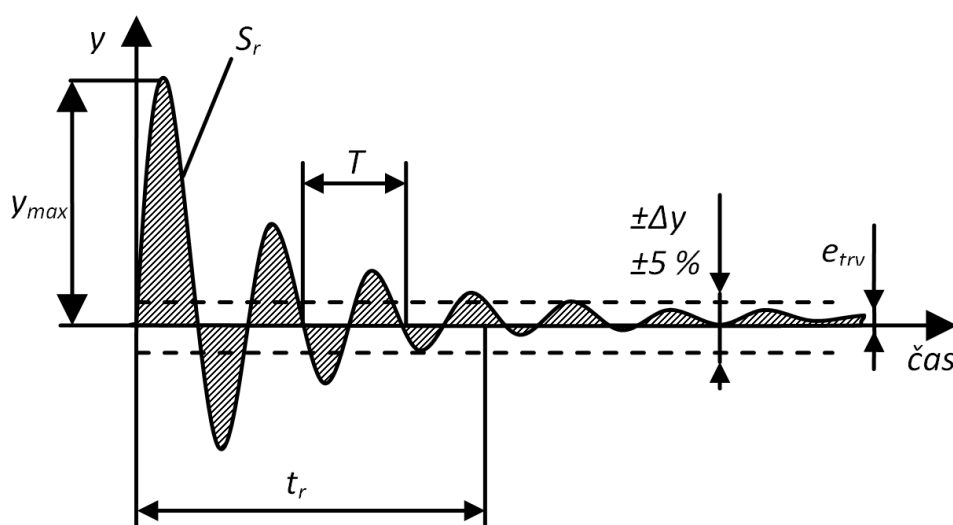
Pro přímé a nepřímé měření pak platí [1]:

$$u_B = \sqrt{\sum_{j=1}^m u_{zj}^2} \quad (7)$$

### 4.3 Hodnocení kvality regulace

U automatického řízení nás především zajímá dosažený výsledek resp. jeho kvalita. Nejčastěji se kvalita regulace hodnotí na základě ocenění regulačního pochodu neboli průběhu regulované veličiny, který je odezvou celého systému na skokovou změnu řídicí nebo poruchové veličiny.

V praxi se hodnotí kvalita regulačního obvodu podle charakteristických parametrů regulačního pochodu, mezi které řadíme: regulační plochu  $S_r$ , maximální regulační odchylku  $Y_{max}$ , trvalou regulační odchylku  $e_{trv}$  a dobu regulace  $t_r$ . Jejich význam při průběhu regulované veličiny je patrný z obr. 8. [3]



Obr. 8 Průběh regulované veličiny. [3]

Pro posouzení kvality regulace, se jako nejvhodnější parametr volí doba regulace  $t_r$ , což je doba, během které klesne odchylka regulované veličiny pod stanovenou hranici, která bývá nejčastěji volena jako  $\pm 5\%$  ustálené hodnoty regulované veličiny. Podobně je obvyklé hodnotit dynamické chování i u měřicí techniky, kde se ale běžně používá přísnější hranice  $\pm 1\%$ . To mimo jiné úzce souvisí s dalšími dynamickými vlastnostmi a u běžných zařízení lze předpokládat, že do 5% tolerance kolem ustálené hodnoty se dostane regulační pochod přibližně za dobu rovnající se trojnásobku časové konstanty, tedy po třech periodách kmitů, jak je vidět na obr. 8. [3]

Pokud jsou tedy požadavky na ustálení regulované veličiny v tolerančním pásmu  $\pm 5\%$ , požadavky na přesnost měřicí techniky budou muset být značně přísnější. Tato spojitost v praxi znamená, že pro regulovanou veličinu v toleranci  $\pm 5\%$ , je třeba vyžadovat kvalitu naměřených dat s přesností  $\pm 1\%$  nebo lepší.

Kvalitu regulace lze často zjednodušit na posouzení regulační plochy. Toto kritérium vychází z energetického hlediska regulace. Plocha regulačního pochodu je přímo úměrná energii potřebné na odstranění regulační odchylky vzniklé poruchou. Plocha je vyjádřena pomocí integrálu, a proto bývá toto kritérium často označováno

jako integrální kritérium kvality regulace. Používá se ve dvou podobách, jako regulační plocha lineární nebo kvadratická. Za předpokladu, že se po odeznění poruchy vrátí regulovaná veličina do původního stavu, a platí tedy  $y(A) = y(0)$ , je lineární regulační plocha  $S_{rL}$  definována vztahem (8) a kvadratická regulační plocha  $S_{rK}$  vztahem (9). [3]

$$S_{rL} = \int_0^{\infty} y(t) dt \quad (8)$$

$$S_{rK} = \int_0^{\infty} [y(t)]^2 dt \quad (9)$$

Především v praxi může být důležitým kritériem kvality regulace také maximální regulační výchylka  $Y_{max}$ . Maximální regulační výchylkou je myšlen maximální překmit při regulaci, který umožňuje celkové dynamické posouzení systému a může způsobit značné problémy v oblasti stability celého systému a také může vést až k destrukci části regulačního obvodu, překročí-li jeho hodnota přípustné meze přetížitelnosti daného členu. O kvalitní regulaci nelze hovořit, zůstane-li po odeznění poruchy na výstupu z regulované soustavy trvalá odchylka, popř. se po změně žádané hodnoty systém ustálí v nové stabilní poloze, která se výrazně liší od požadované. Právě tento parametr kvality je velmi úzce spjat s kvalitou měřicí techniky, resp. může být ovlivněn nedokonalými informacemi dodávanými do řídicího systému. [3]

Při praktickém použití se především snažíme o minimalizaci všech výše uvedených kritérií kvality regulace. Ne vždy je však tato snaha možná pro všechny kritéria. V tom případě se snažíme u toho parametru, který je v daném oboru nebo aplikaci zvlášť významný. Z pohledu výsledku kvality regulace je často považován systém, který má menší regulační plochu, kratší dobu regulace a menší hodnoty regulačních odchylek. I přes vliv různých negativních vlivů je s výslednou kvalitou regulace nejvíce spjata kvalita informací získaná ze zpětné vazby, tedy z hodnot použité měřicí techniky.

#### 4.4 Vliv měření na kvalitu regulace

Sebedokonalejší regulátor nedokáže přesně řídit regulovaný systém, pokud jsou informace ze zpětnovazebného řetězce jakkoli zkresleny. Základním parametrem všech spojitých regulátorů je zesílení, které následně vede ke zvýšení nejistoty či chyby a následně se projevuje ve výsledku trvalé regulační odchylky, zvýšením maximálního překmitu i větší plochou regulačního pochodu.

Případy, kdy si s velkou nejistotou na vstupu dokáže poradit sám regulátor, budou spíše výjimkou. Lze sem zařadit některé speciální rozvětvené regulační obvody, kdy pomocná měřená nebo pomocná regulovaná veličina dokážou částečně eliminovat vstupní nepřesnosti. Další cestou řešení problému je na maximální a přitom ekonomicky únosnou míru zpřesnit měření, a tedy zúžit nejistoty měřicího řetězce ve zpětné vazbě.

Jinou variantou řešení mohou být dokonalejší řídicí systémy, které v režimu samoučení nebo speciálních kompenzačních programů budou schopny nedostatky měřicí větve alespoň částečně eliminovat. Toto řešení je však značně nákladnější a pro praktické nasazení mnohdy nerentabilní. [3]

Mezi dominantními zdroji nejistot řadíme především systémové vlivy na použitou měřicí techniku. Nejmodernější přístroje nám však umožňují tyto vlivy zjistit a pomocí korekcí či kompenzací je v nejlepším případě odstranit, nebo alespoň redukovat na minimum. Systémy s autokalibrací v této problematice vykazují výborné výsledky. [3] Nejsou odkázány na jednorázově zjišťované korekční křivky a tabulky, ale mohou si je na integrovaném etalonu dle potřeby aktualizovat. Takovéto zásahy pak zmenšují účinky alespoň některých zdrojů nejistot a následně i nejistotu celého výsledku měření.

## 5 ZÁVĚR

Tato bakalářská práce si dává za cíl zasvětit budoucího čtenáře do základních pojmů a teorie v oblasti regulace, měřicí techniky, chyb a nejistot měření. Podrobně popsat, kde v měřicím řetězci chyby vznikají a jaký následek mohou mít pro celý regulační systém. Nastínit možnosti řešení zpřesnění měření a eliminaci chyb.

Měření je zprostředkováno měřicí technikou a prostřednictvím zpětné vazby jsou naměřené hodnoty přeneseny do příslušného regulátoru. Při tomto zdánlivě jednoduchém principu dochází k vlivu mnoha negativních činitelů a tímto defektem jsou zatíženy všechny členy regulačního obvodu od čidla, až po samotný regulátor. Ne všechny členy obvodu jsou však stejně náchylné na tyto vlivy, a tak je důležité věnovat pozornost jednotlivým členům při návrhu regulátoru a zpětnovazebního řetězce. Pro dosažení optimálního výsledku regulace je tedy zapotřebí zkušeně sestavit jak členy měřicího řetězce, tak i regulátor a akční členy. Zlepšením výsledku regulace lze také docílit použitím kvalitních součástí a pravidelných kalibrací.

Díky vývoji techniky lze již dnes použít takzvané inteligentní snímače. Jejich vyšší pořizovací náklady se ovšem odrazí v komfortu užívání a integrovaných funkcích. Tyto přístroje disponují funkcemi jako autokalibrace, korekce, volba rozsahu, seřízení nuly a autodiagnostika. Další výhodnou vlastností jsou kompaktní rozměry, díky nimž lze snadno korigovat nepříznivé vlivy okolí. Jako další vývojovou větev moderní měřicí techniky jsou počítačové systémy vybavené potřebnou multifunkční kartou a softwarem. I tyto systémy disponují podobnými vlastnostmi jako inteligentní snímače, avšak multifunkční karta zvládá i funkci řízení, a tak v praxi poskytuje komplexnější řešení.

Pro posouzení kvality výsledku regulace existují kritéria např. minimalizace regulační plochy či velikost regulačních odchylek. Nejistota měřicího řetězce se projeví zkreslením informací vstupujících do regulátoru a lze tedy říci, že kvalitu regulace prvně ovlivní kvalita měřicího řetězce a až poté řídicí systém. Poeticky by se tedy dalo říci, že čím přesněji měří, tím lépe řídí.





## 6 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] JENČÍK, J.; VOLF, J. Technická měření. 2. vyd. Praha : ČVUT, 2003. 213 s.  
ISBN 80-01-02138-6
- [2] ŠVARC, I. Základy automatizace. 1. vyd. Brno : CERM, 2002. 102 s.  
ISBN 80-214-2087-1
- [3] VDOLEČEK, František. Měřicí technika v automatizaci. *Automa* [online]. 2003. č. 12 [cit. 20. května 2010]. Dostupný na WWW:  
[http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=29005](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=29005)